

# 2023 年积石山 Ms 6.2 级地震同震地质灾害初步分析

李为乐<sup>1,2</sup>, 许强<sup>1,2</sup>, 李雨森<sup>1</sup>, 单云锋<sup>1</sup>, 韦春豪<sup>1</sup>,  
巨袁臻<sup>1</sup>, 郁文龙<sup>1</sup>, 王运生<sup>1</sup>, 卢佳燕<sup>3</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 应急管理部滑坡灾害风险预警与防控实验室, 成都 610059;

3. 中国地质调查局 成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 成都 610081)

[摘要] 2023 年 12 月 18 日, 甘肃省临夏回族自治州积石山县发生 Ms 6.2 级地震, 触发了大量同震地质灾害, 亟需查明同震地质灾害的基本特征、发育分布规律和成因机制, 为震后恢复重建与地质灾害防治提供支撑。本文基于多源高分辨率遥感解译和已有研究成果对比分析, 初步揭示了此次地震地质灾害的基本特征和发育分布规律, 并探讨了草滩村液化滑坡—泥流的成因机制。结果表明: 此次地震Ⅶ度及以上烈度区内共发育 1 535 处同震地质灾害, 主要为中小规模黄土滑坡和浅表层岩质崩塌, 集中分布于黄土梁和黄土塬内冲沟两侧、单薄黄土梁两侧以及大型历史滑坡后壁等局部地形较陡峭的部位。地震因素控制了同震地质灾害的区域分布规律, 而地形因素控制了同震地质灾害的局部分布规律。同震地质灾害在 0.1~0.3 g 震峰值加速度区域、发震断层下盘区域、南东坡向、30~60 m 坡高范围、斜坡中部以上 20~40 m 范围分布数量最多。受广泛关注的草滩村“砂涌”灾害本质是饱水黄土在地震作用下发生的液化滑坡。2016 年完成的填沟造地工程改变了滑源区地表和地下水流通条件, 地下水通道被堵塞, 导致地下水位抬升和下部土体饱和可能是该处发生液化滑坡的重要原因。

[关键词] 积石山地震; 同震地质灾害; 分布规律; 黄土滑坡; 液化滑坡—泥流; 填沟造地工程

[分类号] P237, P315.9

[文献标志码] A

## Preliminary analysis of the coseismic geohazards induced by the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake

LI Weile<sup>1,2</sup>, XU Qiang<sup>1,2</sup>, LI Yusen<sup>1</sup>, SHAN Yunfeng<sup>1</sup>, WEI Chunhao<sup>1</sup>,  
JU Yuanzhen<sup>1</sup>, YU Wenlong<sup>1</sup>, WANG Yunsheng<sup>1</sup>, LU Jiayan<sup>3</sup>

[收稿日期] 2024-01-07。

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC3000401); 四川省重点研发项目(2023YFS0435); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2022Z007)。

[第一作者] 李为乐(1982—), 男, 教授, 研究方向: 地质灾害预测评价, E-mail: liweile08@mail.cdut.edu.cn。

[通信作者] 许强(1968—), 男, 教授, 研究方向: 地质灾害防治理论与方法, E-mail: xq@cdut.edu.cn。

[引用格式] 李为乐, 许强, 李雨森, 等, 2024. 2023 年积石山 Ms 6.2 级地震同震地质灾害初步分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1): 33-45+90。

Li W L, Xu Q, Li Y S, et al., 2024. Preliminary analysis of the coseismic geohazards induced by the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1): 33-45+90.

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Laboratory of Landslide Risk Early-Warning and Control, Chengdu 610059, China;
3. Chengdu Center of China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610081, China

**Abstract:** On December 18, 2023, an earthquake with a magnitude of Ms 6.2 occurred in Jishishan County, Gansu Province, triggering a large number of coseismic geohazards. As such, there is an urgent need to identify the characteristics, distribution patterns, and mechanisms of the coseismic geohazards caused by this earthquake to provide support for post-earthquake recovery and reconstruction. Based on multisource high-resolution remote sensing interpretation and a comparative analysis of existing research results, the essential characteristics and distribution patterns of the coseismic geohazards are preliminarily revealed, and the mechanism of the liquefaction landslide mudflow in Caotan Village is explored. The results show that a total of 1 535 coseismic geohazards developed in areas with a seismic intensity of VII or above during the earthquake, mainly consisting of small- and medium-scale loess landslides and shallow rockfalls. These geohazards were mainly distributed on both sides of loess beams and loess plateau gullies, on both sides of thin loess beams, and on the back walls of large historical landslides where the terrain was steep. It is found that earthquake factors controlled the regional distribution pattern of coseismic geohazards, while terrain factors controlled the local distribution pattern of coseismic geohazards. We find that the coseismic geohazards had the highest distribution in areas of peak acceleration of 0.1–0.3 g, footwall areas around the seismic fault, areas where the slope points in a southeastern direction, areas with slope heights of 30–60 m, and areas 20–40 m above the middle of the slopes. The sand surge disaster in Caotan Village, which caused great concern throughout all of society, was a liquefaction landslide caused by saturated loess reacting to earthquake action. This disaster may have been inadvertently exacerbated by the “gully filling and land reclamation project” that completed in 2016, which changed the surface and groundwater flow conditions in the sliding source area. Additionally, groundwater channels were blocked, causing the groundwater level to rise and the lower soil to saturate, which may be an essential reason for the liquefaction landslides in this area.

**Key words:** Jishihan earthquake; coseismic geohazards; distribution pattern; loess landslide; liquefied landslide-mudflow gully filling and land reclamation project

2023年12月18日23时59分,甘肃省临夏回族自治州积石山县境内发生Ms 6.2级地震,震源深度约10 km,属于逆冲型浅源地震,最大烈度达Ⅷ度,地震共造成149人遇难,2人失联,超过15万间房屋损毁(王勤彩等,2024;王立朝等,2024),地震同时触发了大量崩塌、滑坡地质灾害,并诱发了1处大型黄土液化滑坡—泥流(王运生等,2024;李雨森等,2024),亟需查明同震地质灾害的基本特征、发育分布规律和成灾机制,为震后恢复重建与地质灾害防治提供支撑。

针对此次同震地质灾害,中国学者已开展了大量遥感解译分析和现场调查工作。王运生等

(2024)第一时间论述了积石山地震地质灾害的异常特点,发现此次地震地质灾害具有与一般逆冲型地震不同的“下盘效应”,并简要分析了草滩村液化滑坡—泥流的形成原因;王立朝等(2024)第一时间对地震区地质灾害隐患开展了现场核查,共核查隐患点2 044处,发现78处为新增隐患,88处为地震加剧变形的隐患,主要以小型崩塌为主,并分析了其控制因素,认为此次地震地质灾害具有“上盘效应”;铁永波等(2024)对地震区地质灾害隐患开展了现场核查和遥感解译,并对比分析了此次地震和2022年泸定Ms 6.8级地震地质灾害隐患发育规律,发现2次地震地质灾害隐

患发育分布规律呈现显著的差异性;黄观文等(2024)利用全球导航定位系统监测数据分析了主震和余震对 4 处远场滑坡形变的影响,认为此次地震对远场滑坡造成的位移和振动影响在水平方向上较为显著;陈博等(2024)利用光学卫星影像解译出此次地震同震地质灾害 3 767 处,统计分析了其空间分布规律并绘制了同震地质灾害易发性评价图;李亚军等(2024)利用无人机摄影测量、激光 LiDAR 地形测量、地球物探技术和现场调查等综合手段,对草滩村液化滑坡—泥流灾害链过程和成因进行了分析,认为地震诱发台塬面下饱水黄土层液化是本次灾害链的主要原因,滑坡源区长期农业灌溉导致了地下水位上升,而冬季地下水出口被冻结导致地下水位上涨也增加了液化可能性。

上述研究为第一时间了解此次地震同震地质灾害的基本特征、发育分布规律和典型灾害的成因机制提供了重要参考。但上述研究仍然存在规律认识不统一、成因机制认识不深入等问题。为此,本文基于多源高分辨率遥感解译和已有研究成果对比分析,以期揭示此次地震地质灾害的基本特征和发育分布规律,并进一步探讨草滩村液化滑坡—泥流的成因机制,为震后恢复重建与地质灾害防治提供支撑。

## 1 研究区概况

本次地震震中区域位于青藏高原一级地貌阶梯向黄土高原二级地貌阶梯过渡地带(图 1)。该区域活动断裂发育,历史强震活动频繁,自 1949 年以来震中周边 200 km 范围内发生 6.0 ~ 6.9 级地震 2 次,5.0 ~ 5.9 级地震 14 次(王运生等,2024;李雨森等,2024)。此次地震发震断裂为拉脊山北缘逆冲断裂,断裂两侧地貌主要由断裂西侧的积石山山脉(海拔高程 2 200~3 500 m)和断裂东侧的低缓丘陵内嵌盆地(海拔高程 1 800~2 200 m)组成;发震断裂的下盘(东侧)地层岩性主要为新近系他拉组和毛沟组的砂泥红色岩系,地表覆盖厚度不均的上更新统风成马兰黄土;断裂上盘(西侧)主要以侵入岩为主(王运生等,2024)。研究区发育大量大型历史古老滑坡,利用 Google Earth 卫星影像平台对该类型滑坡进行了遥感解译,在地震Ⅶ度及以上烈度区内共识别历史古老滑坡 2 191 处(图 1),滑坡总面积约 96.4 km<sup>2</sup>,最小面积约 370 m<sup>2</sup>,最大面积约 2.6×10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>,平均

面积约 4.4×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>。

## 2 同震地质灾害编目与特征规律

### 2.1 数据与方法

本次地震后天气晴朗,为震区光学影像获取和灾情快速解译提供了有利条件。震后第二天,中国资源卫星应用中心、长光卫星技术有限公司、应急管理部国家减灾中心等单位便分别获取了震中附近区域高分辨率卫星和航空影像。本研究收集了中国资源卫星应用中心提供的 2023 年 12 月 19 日覆盖整个Ⅶ度烈度区的高分一号卫星影像(分辨率 2.0 m)、北京视宝卫星图像有限公司中心提供的 2023 年 12 月 20 日几乎覆盖整个Ⅶ度烈度区的 Pleiades 卫星影像(分辨率 0.5 m)以及应急管理部国家减灾中心在线提供的 2023 年 12 月 19 日覆盖大河家镇—中川乡重灾区的航空影像(分辨率 0.1 m)(图 1)。同时,从 Google Earth 卫星影像平台下载了研究区 2021—2022 年震前卫星影像(分辨率约 0.5 m);利用 ENVI 遥感软件对获取的震后高分一号和 Pleiades 卫星影像进行大气校正、正射校正、分辨率融合等预处理后,与震前卫星影像一并导入 ArcGIS 软件,通过人工目视对比解译的方式进行同震地质灾害编目。应急管理部国家减灾中心在线提供的重灾区航空影像主要用于同震地质灾害解译标志建立和重点地质灾害详细分析。

此外,从美国地质调查局网站(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000ljpg/executive>)下载了地震峰值加速度数据,从欧洲航天局网站(<https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>)下载了 30 m 分辨率高程模型数据(Copernicus DEM, COP-DEM)。并由 COP-DEM 数据生成了坡度图、坡向图、坡高图和地形位置指数图,用于统计分析同震地质灾害与各影响因素之间的关系。

### 2.2 同震地质灾害数量、类型与规模

通过地震前后高分辨率卫星影像目视对比解译,在此次地震Ⅶ度烈度区解译同震地质灾害 1 535 处(图 2),地质灾害总面积 2.0 km<sup>2</sup>,最小面积约 38 m<sup>2</sup>,最大面积 39×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>(为草滩村液化滑坡—泥流),平均面积约 1 300 m<sup>2</sup>,中小规模黄土滑坡占比较大(图 3-A,B),其他少量同震地质灾害为浅表层岩质崩塌(图 3-C,D)。

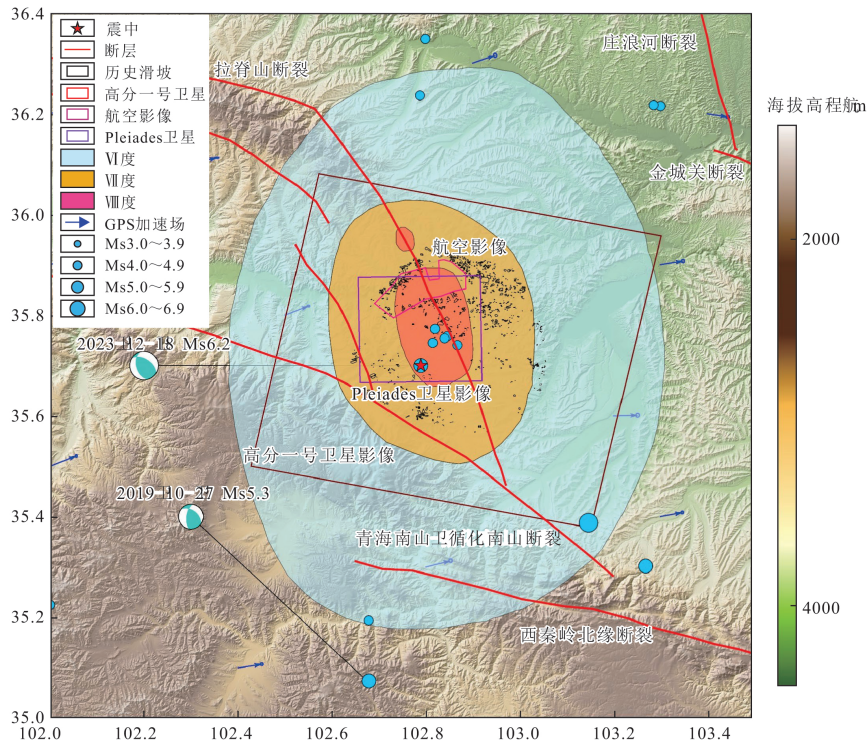


图 1 积石山地震构造背景图 (历史地震信息及震源机制解来自 USGS)

Fig. 1 Tectonic background map of the Jishishan earthquake(The historical earthquake information and source mechanism data are from the USGS)

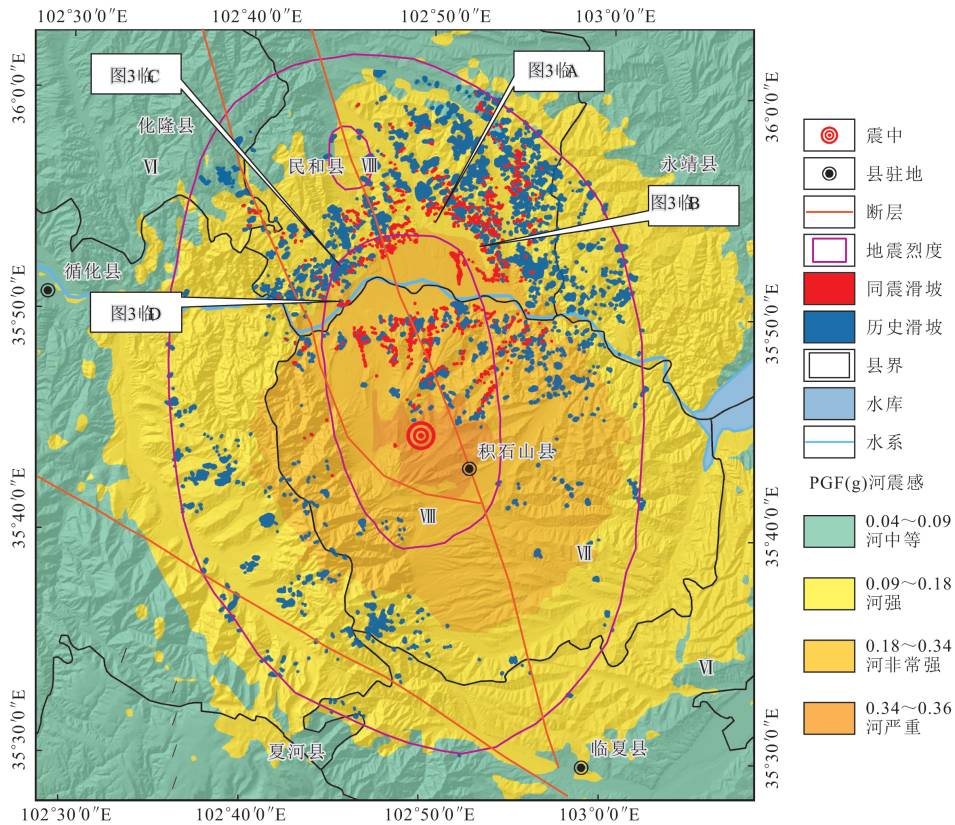


图 2 积石山地震同震和历史地质灾害分布图

Fig. 2 Coseismic and historical geohazard distribution map of the Jishishan earthquake

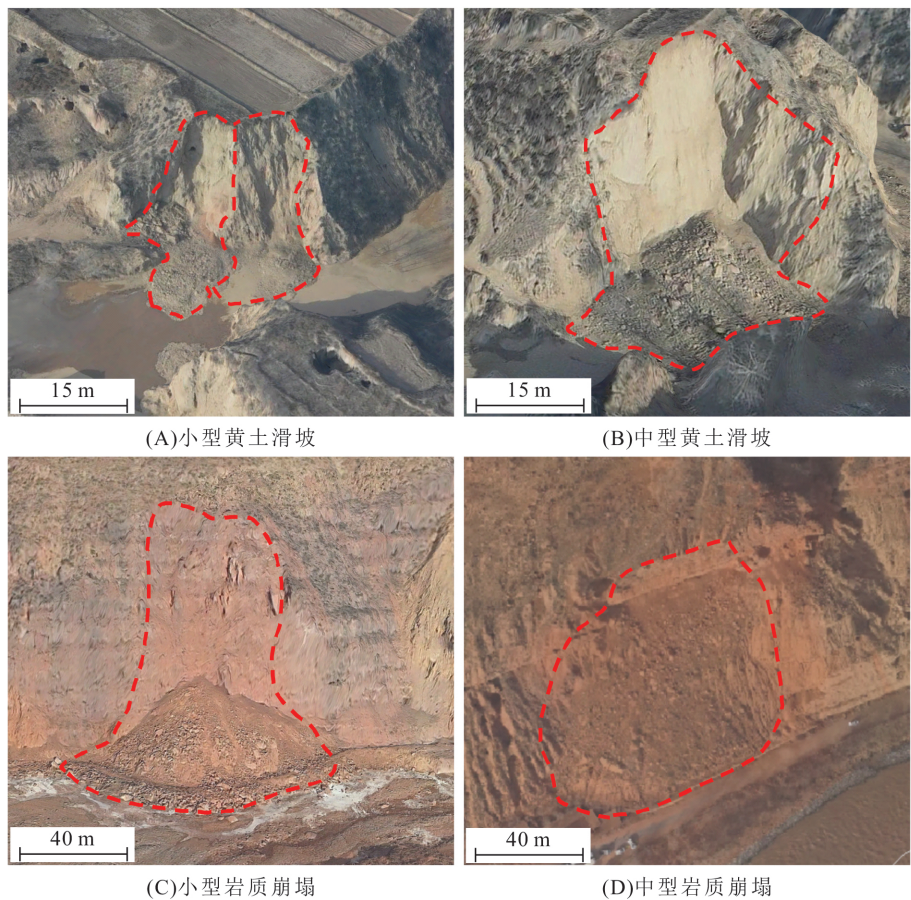


图 3 典型同震地质灾害三维航空影像  
 Fig. 3 Three-dimensional aerial images of typical coseismic geohazards

为进一步分析地质灾害的规模特征,分别绘制了此次地震同震地质灾害与历史地质灾害面积密度概率曲线对比图(图 4-A)和多次地震同震地质灾害面积密度概率曲线对比图(图 4-B),包括

此次地震、2013 年芦山 Ms 7.0 级地震、2017 年九寨沟 Ms 7.0 级地震、2017 年林芝 Ms 6.9 级地震和 2018 年日本北海道 Mw 6.6 级地震。地质灾害面积密度概率曲线图表示的是不同面积地质

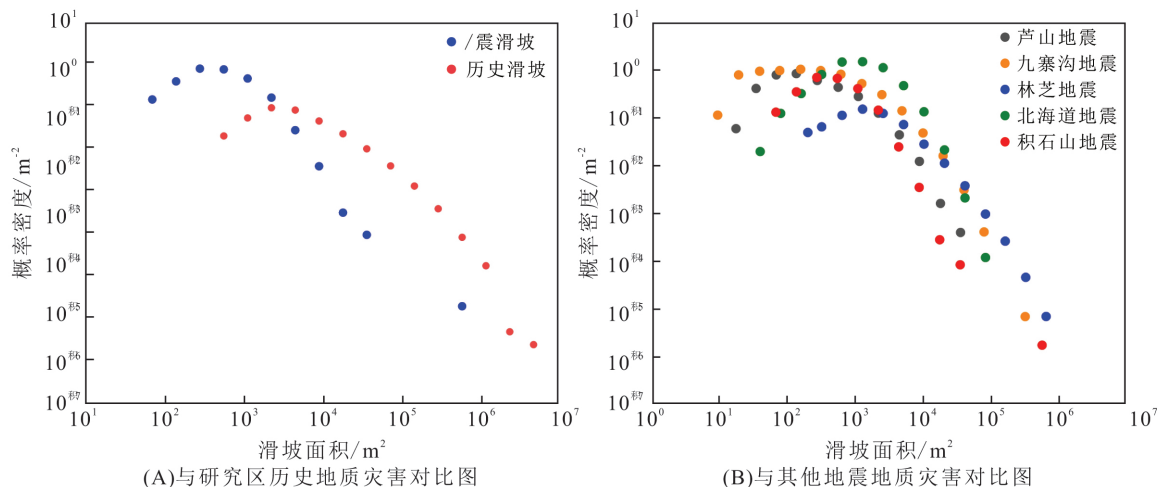


图 4 同震地质灾害面积概率密度图  
 Fig. 4 Probability density map of the coseismic geohazard area

灾害发生的频率,常用来表征一次事件触发的地质灾害的规模特征。其中,曲线转折点常被用来区分一次事件中地质灾害规模的标志。一般认为,转折点对应的面积越大,则该次事件地质灾害的平均规模越大;面积小于转折点所对应面积的地质灾害被划分为该次事件中的小型地质灾害,反之,面积大于转折点所对应面积的地质灾害被划分为该次事件中的中、大型地质灾害(李为乐, 2019)。图 4-A 所示,此次地震同震地质灾害规模显著小于历史地质灾害规模。图 4-B 所示,5 次强震地质灾害规模排序为林芝地震>北海道地震>积石山地震>九寨沟>芦山地震。可见,虽然积石山地震震级小于芦山地震和九寨沟地震,但其同震地质灾害规模却比芦山地震和九寨沟地震大。

### 2.3 同震地质灾害分布特征与规律

#### 2.3.1 同震地质灾害分布特征

区域上,同震地质灾害主要分布于青海省民

和县南部(938 处,占总数的 61.1%)和甘肃省积石山县北部(576 处,占总数的 37.5%);同震地质灾害在Ⅶ度烈度区共有 899 处(占总数的 58.6%),在Ⅷ度烈度区共有 636 处(占总数的 41.4%),Ⅶ度烈度区地质灾害占比明显多于Ⅷ度烈度区;同震地质灾害集中分布在震感非常强和强的区域(按美国地质勘测局提供的地震峰值加速度和分级标准进行划分),分别为 757 处和 751 处,共占总数的 98.2%,而震感严重区仅有 3 处,历史滑坡在该区域也较少分布,分析主要原因可能是该区域地质条件相对稳定,不易发生地质灾害;此外,同震地质灾害与历史滑坡在区域分布上具有较好的一致性。但局部来看,同震地质灾害与历史滑坡具体分布位置有显著差异,二者位置重叠的很少(图 5),同震地质灾害主要发育在黄土梁和黄土塬内部冲沟两侧、单薄黄土梁两侧以及大型历史滑坡后壁等局部地形较陡峭的部位(图 5、图 6)。

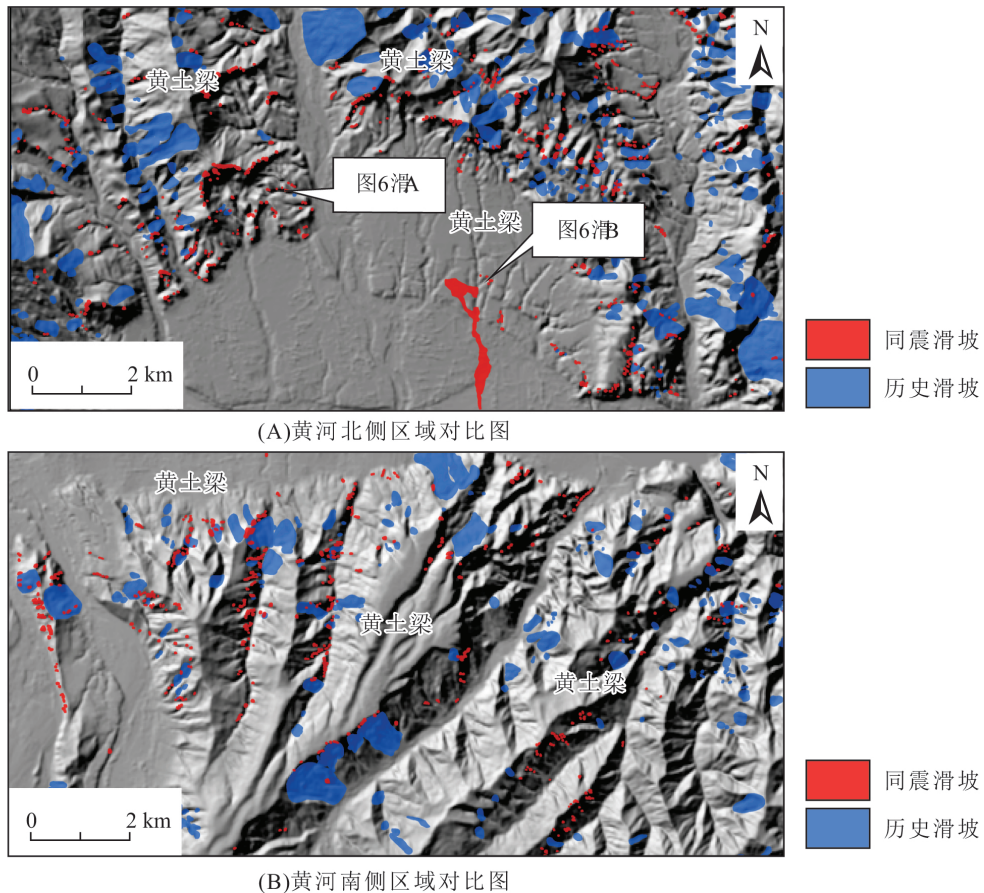


图 5 同震地质灾害与历史地质灾害空间分布对比图

Fig. 5 Comparison of spatial distributions of coseismic geohazards and historical geohazards

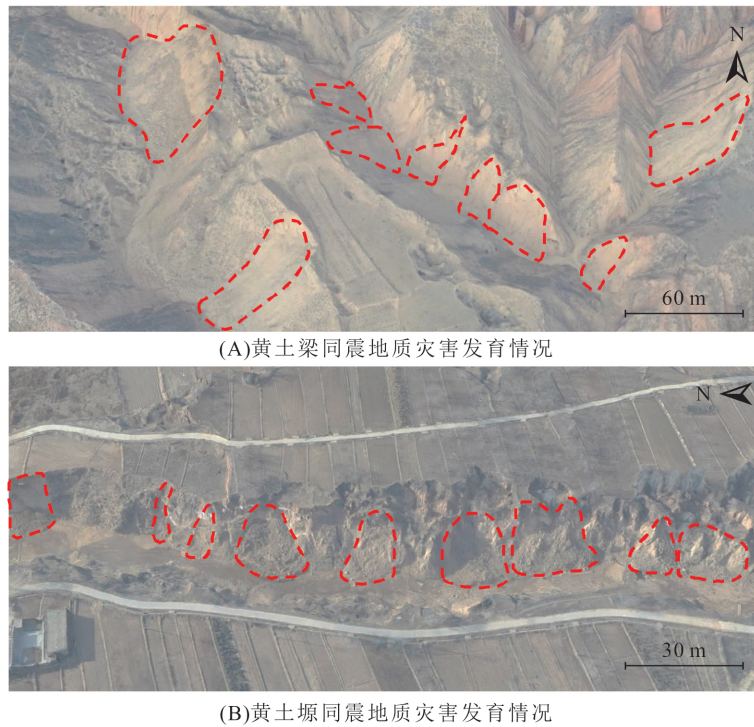


图 6 黄土梁和黄土塬同震地质灾害发育情况对比图

Fig. 6 Comparison of the development of coseismic geohazards related to loess ridges and loess tablelands

### 2.3.2 同震地质灾害分布规律统计

为了揭示同震地质灾害空间分布规律,本文分别统计了同震地质灾害与 2 个地震触发因子(地震峰值加速度、发震断层距离)和 4 个地形孕灾因子(坡度、坡向、坡高、地形位置指数)的相互关系(图 7)。

#### (1) 与地震峰值加速度的关系

如图 7-A 所示,同震地质灾害数量和点密度与地震峰值加速度的关系并不同步。地震峰值加速度  $< 0.1 g$  的区域同震地质灾害数量非常少,同震地质灾害点密度低;当地震峰值加速度  $\geq 0.1 g$  后,同震地质灾害数量随地震峰值加速度增加而逐渐减少,同震地质灾害点密度先整体随地震峰值加速度增加而增大,但  $\geq 0.3 g$  后又迅速降低,这不符合同震地质灾害空间分布与地震峰值加速度一般统计规律。分析其原因,可能是地震影响区地貌差异性较大导致。同震地质灾害主要发育于黄土梁和黄土塬冲沟两侧、单薄黄土梁两侧等黄土地貌区,而地震峰值加速度较大的震中区域则地形相对平缓,地质灾害不易发。

#### (2) 与发震断层距离的关系

此次地震发震断层为拉脊山北缘逆冲断裂(王运生等,2024)。对于逆冲型发震断裂,其上下

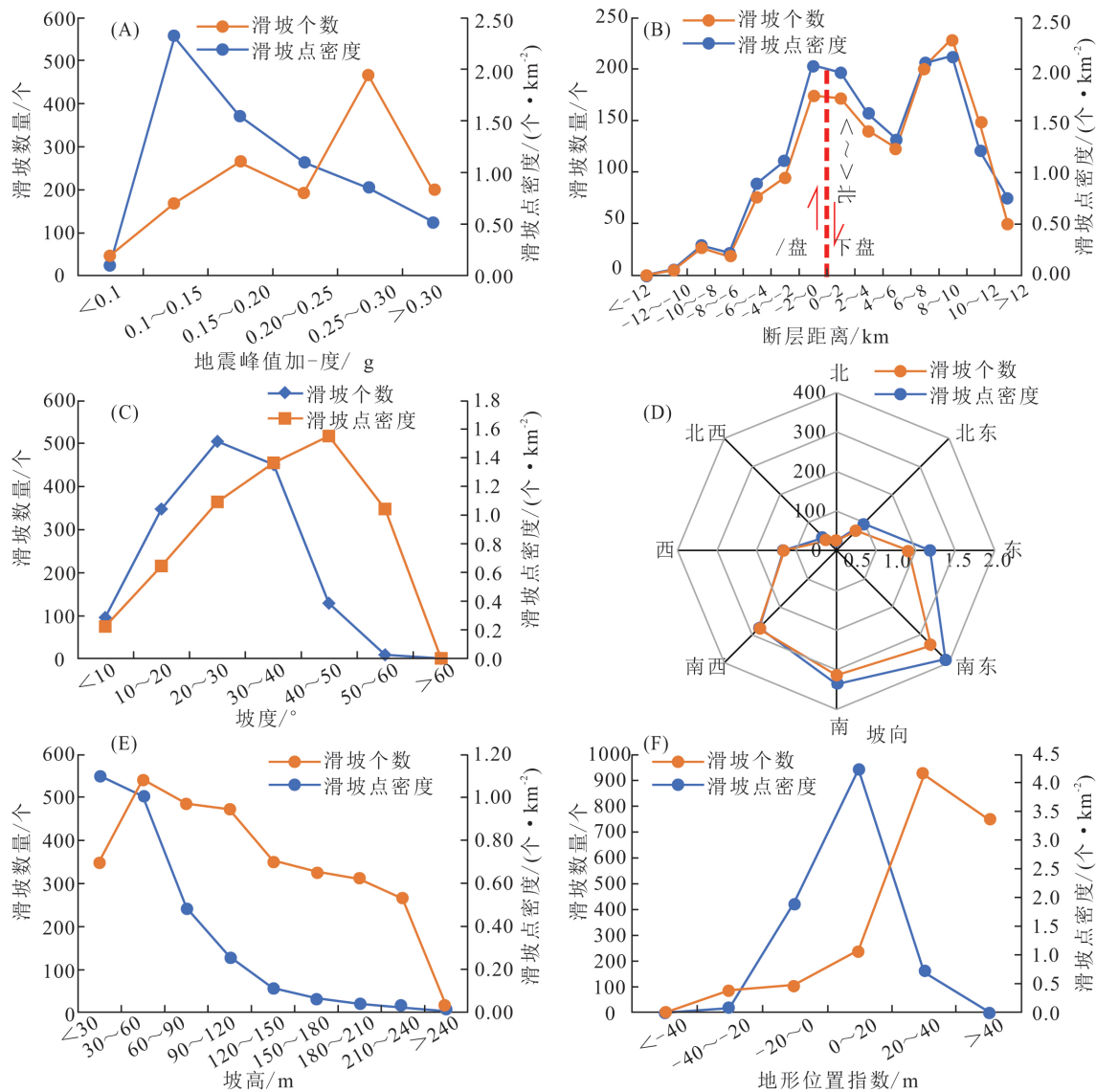
盘同震地质灾害发育密度往往具有较大差异。因此,本研究以 2 km 为间隔分别统计上、下盘同震地质灾害发育情况。如图 7-B 所示,同震地质灾害数量和点密度与发震断层距离的关系有较好的一致性。整体上,此次地震发震断层下盘同震地质灾害要显著多于上盘,表现出“下盘效应”,与汶川地震、芦山地震、米林地震等逆冲型地震表现出的“上盘效应”不同(李为乐,2019)。在发震断层上盘,同震地质灾害数量和点密度均随距发震断层距离增大而迅速降低。在发震断层下盘,同震地质灾害数量和点密度先随距发震断层距离增大而降低,但在 6~10 km 区域同震地质灾害数量和点密度又逐渐增大,随后随距发震断层距离增大而降低。

#### (3) 与坡度的关系

如图 7-C 所示,同震地质灾害数量和点密度与坡度的关系基本一致,均随坡度增加而先增大后减小。同震地质灾害数量在  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  达到最大值,而同震地质灾害点密度在  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$  达到最大值。

#### (4) 与坡向的关系

如图 7-D 所示,同震地质灾害数量和点密度与坡向的关系有较高的一致性,南东、南和南西为此次地震同震地质灾害发生的优势坡向,其中南



(A)与地震峰值加速度的关系,(B)与距发震断层距离的关系,(C)与坡度的关系,(D)与坡向的关系  
(E)与坡高的关系,(F)与地形位置指数的关系

图 7 同震地质灾害与不同影响因子关系统计图

Fig. 7 Statistical diagram of the relationship between the coseismic geohazards and the different influencing factors

东向同震地质灾害数量和点密度均最大。

(5)与坡高的关系

如图 7-E 所示,同震地质灾害数量随坡高增大而逐渐减少,坡高 < 30 m 的区域数量最大,30 ~ 60 m 坡高区域次之,而后同震地质灾害数量迅速降低;而同震地质灾害点密度在 30 ~ 60 m 坡高区域最大,随后缓慢降低,≥ 240 m 坡高后同震地质灾害点密度迅速降低。

(6)与地形位置指数的关系

地形位置指数表征的是地面某点与邻域范围其他点在地形上的相对位置关系,0 值表示坡中

位置,正值表示距离坡中向山脊的距离,负值表示距离坡中向山沟的距离。如图 7-F 所示,同震地质灾害数量在 0 ~ 20 m 地形位置指数的区域(斜坡中部以上 0 ~ 20 m)数量最大,随后向坡上和坡下同震地质灾害数量迅速降低;而同震地质灾害点密度在斜坡中部以上 20 ~ 40 m 范围最大,随后向坡上和坡下同震地质灾害点密度迅速降低。

### 3 草滩村液化滑坡—泥流分析与讨论

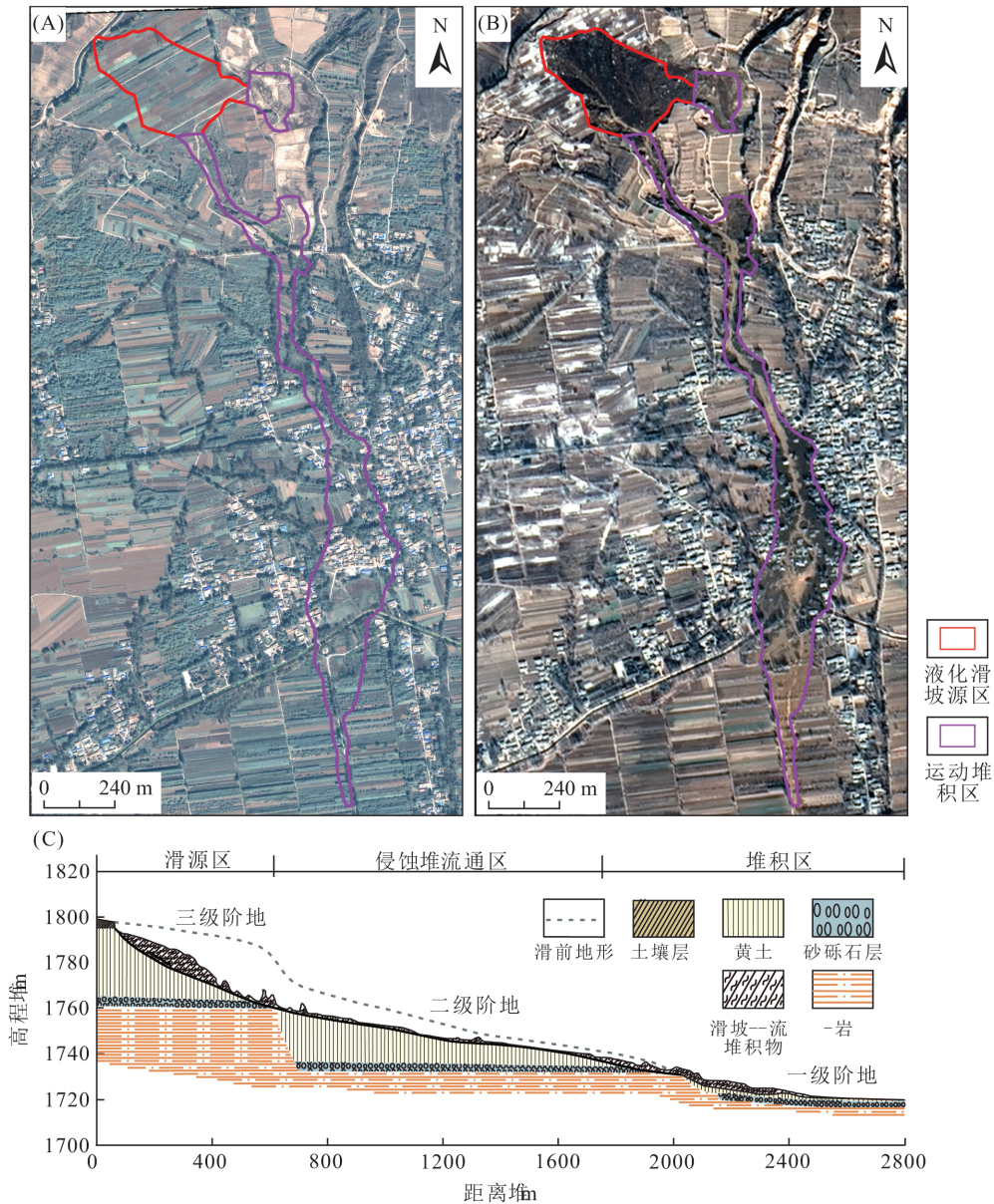
本次地震在震中东北方向青海省海东市民和县中川乡境内草滩村附近触发了 1 处大型液化滑坡—

泥石流灾害,损毁民房 95 间,阻断道路 19 条,导致 20 名群众被掩埋(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,2023),是截至 2023 年 12 月 31 日此次地震地质灾害中造成损失最严重的地质灾害。

### 3.1 草滩村液化滑坡—泥流基本特征

通过地震前后卫星影像解译(图 8-A,B),草滩村液化滑坡—泥流面积约  $39 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,其中滑源区面积约  $11 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,运动堆积区面积约  $28 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑坡源区长约 400 m,平均宽约 260 m,

运动堆积区长约 2 400 m。滑坡源区位于黄河三级阶地黄土台塬上,为一较平坦的耕地,李亚军等(2024)认为地震诱发台塬面下饱水黄土层液化是本次灾害的主要原因。2014 年 3 月 26 日卫星影像显示,滑坡所在黄土台塬两侧冲沟发育(图 9-A);而 2016 年 11 月 14 日卫星影像显示,此时两侧冲沟已被填沟造地工程填埋(图 9-B),这严重改变了滑源区地表和地下水流通条件。2021 年 2 月 21 日和 2022 年 4 月 7 日卫星影像上可明显看

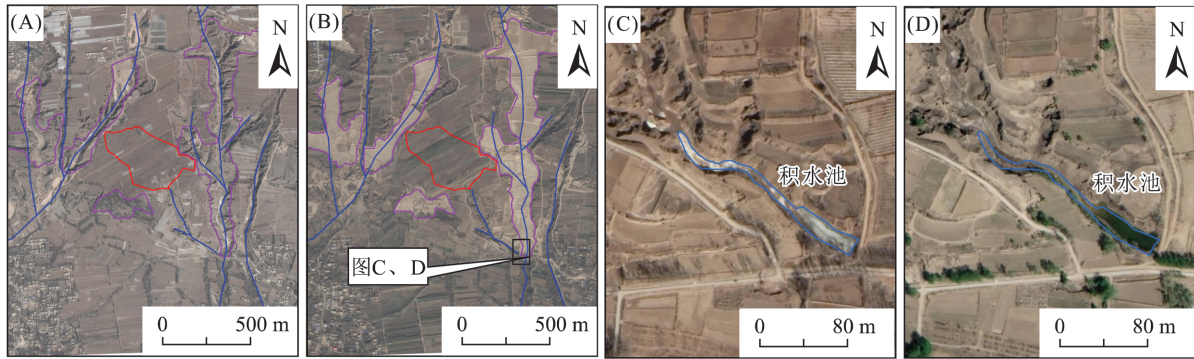


(A)2019 年 1 月 10 日卫星影像,(B)2023 年 12 月 19 日卫星影像,

(C)纵剖面图(改自李亚军等,2024)

图 8 液化滑坡—泥流卫星影像和剖面图

Fig. 8 Satellite images and the profile of the liquefaction landslide/mudflow



(A)2014年3月26日卫星影像,(B)2016年11月14日卫星影像,  
(C)2021年2月21日卫星影像,(D)2022年4月7日卫星影像

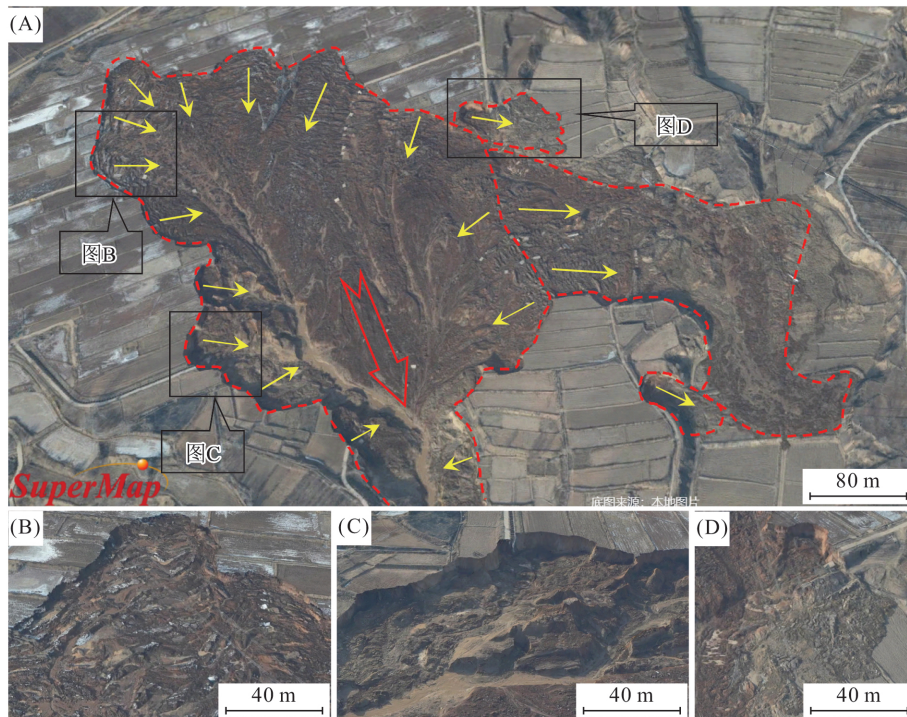
图 9 滑坡源区多时相卫星影像

Fig. 9 Multi-temporal satellite images of the landslide source areas

到滑源区正南方冲沟形成了一个积水池(图 9-C, D),表明地下水通道被堵塞,这将导致地下水位抬升,下部土体饱和,可能是该处发生液化滑坡—泥流灾害的重要原因。

图 10 为滑坡源区三维航空影像,可以清晰地看到滑体含水率极高,中部拉槽内可见流水,呈现出明显的液化滑动特征。推测地震时滑体从不同方向液化启动,向滑坡源区中部汇集,最后从下方冲沟处滑出,继续向下游不断流动,转化成泥流。

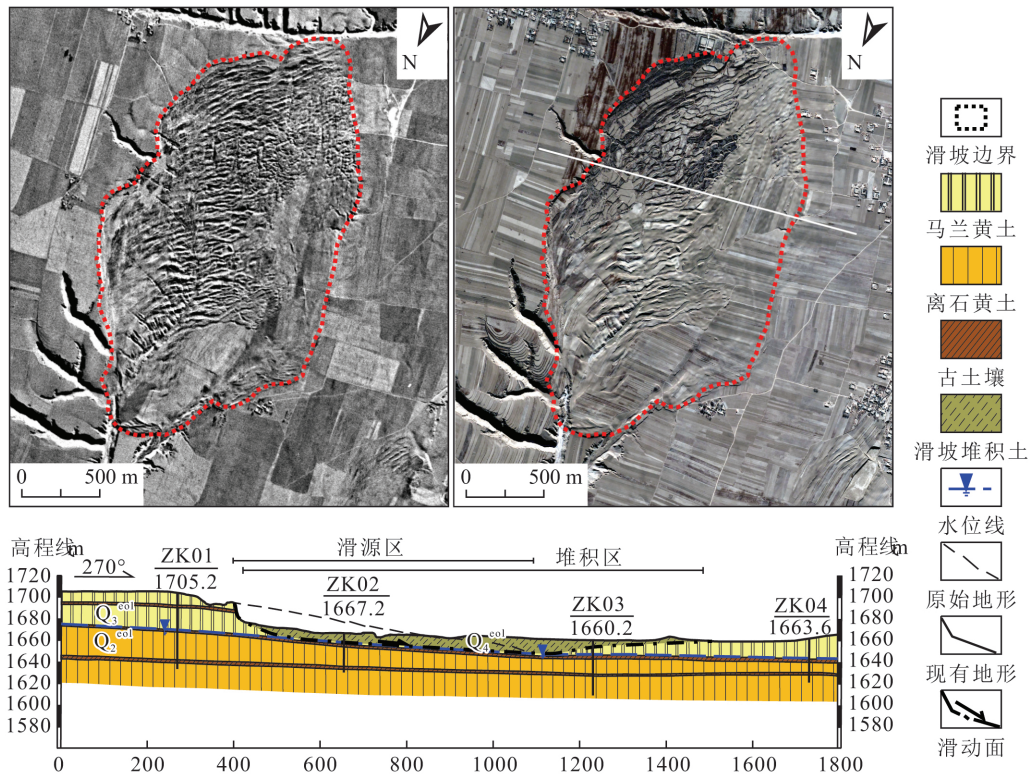
该液化滑坡源区形态特征与 1920 年 12 月 16 日海原 Ms 8.5 级地震触发的石碑源液化滑坡非常类似(图 11)。针对石碑源液化滑坡的形成机制已有大量的研究(徐敏等,2014)。张晓超(2015)认为,其成因机制为地震动作用下黄土结构破坏—饱和带超孔压累积发展—饱和带黄土液化上涌与侧向扩离—上覆黄土层引张拉裂—液化带托浮上层黄土作长距离流滑,可为此次草滩村液化滑坡—泥流形成机制研究提供参考。



(A)整个滑坡源区三维航空影像,(B)滑坡源区后缘三维航空影像,  
(C)滑坡源区右侧三维航空影像,(D)滑坡源区左侧独立滑坡三维航空影像

图 10 滑坡源区三维航空影像

Fig. 10 Three-dimensional aerial images of the landslide source area



(A)1970 年 12 月 2 日美国锁眼卫星影像,(B)2005 年 1 月 18 日卫星影像,  
(C)纵剖面图(改编自张晓明,2015)

图 11 石碑塬滑坡卫星影像和剖面图

Fig. 11 TSatellite images and the profile of the Shibei Yuan landslide

### 3.2 对喇家遗址史前灾害成因之谜的启示

黄河上游官亭盆地喇家遗址齐家文化聚落受灾毁灭成因是学术界热议的焦点之一,主要存在 3 种学说(黄春长等,2019)。第一种为“地震—洪水”说,认为在距今 4 000 年前后,官亭盆地发生大地震,直接导致房屋倒塌和屋内人员死亡,其后黄河干流发生超级大洪水,洪水淹没了被地震毁坏的聚落废墟,导致遗址被滞流沉积的红色黏土掩埋(夏正楷等,2003)。该假说主要有两方面存疑,其一是史前人类居住房屋简陋,地震导致房屋坍塌直接造成大量人员同时死亡的可能性较小;其二是洪水具有冲击力和浮力,洪水过后人类遗体不太可能保留在遗址原地附近。

第二种为“地震—滑坡堰塞湖—溃决洪水”说,认为在距今 3 870 年左右的一场大地震在喇家遗址上游积石峡附近黄河干流形成了大规模滑坡堰塞湖,数个月后堰塞湖溃决,溃决洪水直接导致喇家遗址齐家文化聚落被冲毁掩埋(Wu et al.,2016)。该假说主要有两方面存疑,其一是堰塞湖溃决洪水的冲击力更大,洪水过后人类遗体

不太可能保留在遗址原地附近;其二是相关学者对积石峡古堰塞湖沉积物测年表明堰塞湖并没有马上溃决而是存续了约 3 000 年,且消亡时间要比喇家遗址聚落毁灭时间早约 1 500 年(黄春长等,2019)。

第三种为“地震—山洪泥石流”说,认为在距今 3 950 年前,与官亭盆地大地震相伴随,在喇家遗址聚落北部丘陵山区大规模山洪泥石流,二者共同导致了喇家遗址齐家文化聚落被震毁掩埋(黄春长等,2019)。该假说是目前最被认可的,但仍然存疑,主要是泥石流冲出沟口后,即为非常广阔的平地,泥石流会迅速向两侧扩散堆积,其流速和堆积厚度会迅速降低,很难对沟口下游约 2.5 km 的喇家遗址齐家文化聚落进行掩埋。

此次草滩村液化滑坡—泥流直接导致下游 1~1.7 km 范围大量房屋和人员迅速被掩埋。喇家遗址距离草滩村液化滑坡—泥流直线距离仅 4 km,地形和地质条件基本一致,完全具有在强震作用下发生大规模液化滑坡—泥流灾害的可能。因此,地震液化滑坡—泥流极有可能是喇家遗址

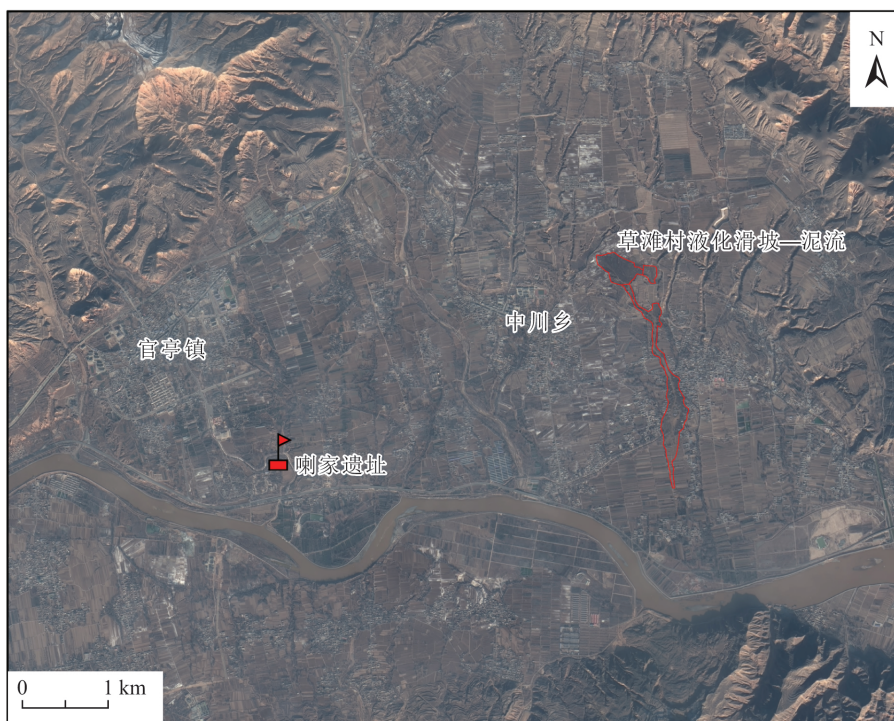


图 12 草滩村液化滑坡与喇家遗址位置图

Fig. 12 Location map of the Caotancun liquefied landslide and the Lajia site

齐家文化聚落受灾毁灭的真正原因。建议后续可以按此思路开展更深入研究,从而揭开喇家遗址史前灾害成因之谜。

#### 4 结论

本文基于多源高分辨率遥感解译和已有研究成果对比分析,初步揭示了积石山地震地质灾害的基本特征和发育分布规律,探讨了草滩村液化滑坡—泥流的成因机制,得到以下主要认识:

a. 在此次地震Ⅶ度及以上烈度区识别出同震地质灾害 1 535 处,主要为中小规模黄土滑坡和浅表层岩质崩塌,集中发育在黄土梁和黄土塬内部冲沟两侧、单薄黄土梁两侧以及大型历史滑坡后壁等局部地形较陡峭的部位。

b. 地震因素控制了同震地质灾害的区域分布规律,同震地质灾害主要分布于地震峰值加速度大于  $0.1 g$  且小于  $0.3 g$  的区域,并表现出明显的“下盘效应”,即发震断层下盘地质灾害数量要显著高于上盘,与其他逆冲型地震表现出来的“上盘效应”差异明显。地形因素控制了同震地质灾害的微观分布规律,同震地质灾害在  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  坡度区域、南东坡向、 $30 \sim 60 m$  坡高区域、斜坡中部以上  $20 \sim 40 m$  的区域分布数量最多。

c. 草滩村“砂涌”灾害本质是饱水黄土在地震作用下发生的液化滑坡。2016 年完成的填沟造地工程改变了滑源区地表和地下水流通条件,地下水通道被堵塞,导致地下水位抬升和下部土体饱和,可能是该处发生液化滑坡的重要原因。

d. 喇家遗址距离草滩村液化滑坡—泥流直线距离仅  $4 km$ ,两地的地形和地质条件相似,在强震作用下喇家遗址具有发生大规模液化滑坡—泥流灾害的可能,因此本研究为喇家遗址齐家文化聚落受灾毁灭的研究提供了重要线索。

致谢:感谢中国资源卫星应用中心、北京视宝卫星图像有限公司中心和应急管理部国家减灾中心提供了震区卫星影像和无人机航空影像,关于对喇家遗址史前灾害成因的讨论参考了凤凰新闻唐驳虎的部分观点,在此一并表示感谢。

#### [ 参 考 文 献 ]

- 陈博,宋闯,陈毅,等,2024. 2023 年甘肃积石山  $M_s 6.2$  地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), DOI: 10.13203/j.whugis20230497.

- Chen B, Song C, Chen Y, *et al.*, 2024. Emergency identification and influencing factor analysis of coseismic landslides and building damages induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, DOI:10.13203/J.whugis20230497. (in Chinese)
- 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室. 甘肃积石山 6.2 级地震中川乡泥石流(“砂涌”)成因分析[EB/OL]. [2023-12-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/2CKNIhj4YqKjNrKLIZVPSQ>.
- 黄春长, 郭永强, 张玉柱, 等, 2019. 青海官亭盆地喇家遗址全新世地层序列与史前灾难研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(2): 434-455.
- Huang C C, Guo Y Q, Zhang Y Z, *et al.*, 2019. Holocene sedimentary stratigraphy and pre-historical catastrophes over the Lajia Ruins within the Guanting Basin in Qinghai Province of China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 49(2): 434-455. (in Chinese)
- 黄观文, 景策, 李东旭, 等, 2024. 甘肃积石山 6.2 级地震对滑坡易发区的变形影响分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, DOI:10.13203/J.whugis20230490.
- Huang G W, Jing C, Li D X, *et al.*, 2024. Deformation analysis of Jishishan Mw6.2 earthquake on the landslide hazard areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, DOI:10.13203/J.whugis20230490. (in Chinese)
- 李为乐, 2019. 典型强震同震地质灾害分布规律及后效应研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆, 2019.
- Li W L, 2019. Distribution Pattern and Post-earthquake Effect of Coseismic Landslides of Strong Earthquakes [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 李亚军, 岳东霞, 陈冠, 等, 2024. 积石山地震诱发金田—草滩村滑坡—泥石流灾害链过程及成因[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 60(1).
- Li Y J, Yue D X, Chen G, *et al.*, 2024. A preliminary analysis of the process and cause of the Jintian-Caotan landslide-mudflow hazard chain induced by the Jishishan Earthquake [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 60(1). (in Chinese)
- 李雨森, 李为乐, 许强, 等, 2024. 2023 年积石山 Ms 6.2 地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 51(1): 22-32+75.
- Li Y S, Li W L, Xu Q, *et al.*, 2024. Coseismic deformation and slip distribution of the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake revealed by InSAR observations [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(1): 22-32+75. (in Chinese)
- 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等, 2024. 积石山 Ms 6.2 级和泸定 Ms 6.8 级地震地质灾害发育规律对比[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 51(1): 9-21+59.
- Tie Y B, Zhang X Z, Cao J W, *et al.*, 2024. Comparative research of characteristics of geological hazards induced by Jishishan (Ms6.2) and Luding (Ms6.8) earthquakes [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(1): 9-21+59. (in Chinese)
- 王立朝, 侯圣山, 董英, 等, 2024. 甘肃积石山 Ms 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J/OL]. *中国地质灾害与防治学报*, 1-11 [2024-01-02] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2852.P.20231228.1352.002.html>.
- Wang L C, Hou S S, Dong Y, *et al.*, 2024. Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan Ms 6.2 earthquake and suggestions for their risk control [J/OL]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1-11 [2024-01-02] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2852.P.20231228.1352.002.html>. (in Chinese)
- 王勤彩, 罗钧, 陈翰林, 等, 2024. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源机制解 [J/OL]. *地震*, 1-4 [2024-01-02]
- Wang Q C, Luo J, Chen H L, *et al.*, 2024. Focal mechanism for the December 18, 2023, Jishishan Ms6.2 earthquake in Gansu Province [J/OL]. *Earthquake*, 1-4 [2024-01-02] (in Chinese)
- 王运生, 赵波, 吉锋, 等, 2024. 2023 年甘肃积石山 Ms 6.2 级地震震害异常的启示 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 51(1): 1-8.
- Wang Y S, Zhao B, Ji F, *et al.*, 2024. Preliminary insights into some hazards triggered by the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake, Gansu Province [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(1): 1-8. (in Chinese)
- 夏正楷, 杨晓燕, 叶茂林, 2003. 青海喇家遗址史前灾难事件 [J]. *科学通报*, 11: 1200-1204.
- Xia Z K, Yang X Y, Ye M L, 2003. The prehistoric disaster event at the Lajia Site in Qinghai Province [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 11: 1200-1204. (in Chinese)

(2):84-95.

Shu H L, Wang L Z, Yin K G, *et al.*, 2020. Geological modeling of shale gas reservoir during the implementation process of geology-engineering integration [J]. *China Petroleum Exploration*, 25(2):84-95. (in Chinese)

王治平, 张庆, 刘子平, 等, 2021. 斜坡型强非均质页岩气藏高效开发技术——以川南威远地区龙马溪组页岩气藏为例[J]. *天然气工业*, 41(4):72-81.

Wang Z P, Zhang Q, Liu Z P, *et al.*, 2021. Efficient development technology slope-type strongly heterogeneous shale gas reservoirs: A case study on the Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Weiyuan area of the southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 41(4):72-81. (in Chinese)

位云生, 王军磊, 于伟, 等, 2021. 基于三维分形裂缝模型的页岩气井智能化产能评价方法[J]. *石油勘探与开发*, 48(4):787-796.

Wei Y S, Wang J L, Yu W, *et al.*, 2021. A smart productivity evaluation method for shale gas wells based on 3D fractal fracture network model [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(4):787-796. (in Chinese)

吴明录, 丁明才, 2020. 分形离散裂缝页岩气藏多级压裂水平井数值试井模型[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 44(3):98-104.

Wu M L, Ding M C, 2020. A numerical well testing interpretation model for multiple fractured horizontal well in fractured shale gas reservoir based on fractal discrete fracture network [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 44(3):98-104. (in Chinese)

谢军, 2018. 长宁—威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. *天然气工业*, 38(2):1-7.

Xie J, 2018. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction [J]. *Natural Gas Industry*, 38(2):1-7. (in Chinese)

张琴, 梁峰, 梁萍萍, 等, 2020. 页岩分形特征及主控因素研究——以威远页岩气田龙马溪组页岩为例[J]. *中国矿业大学学报*, 49(1):110-122.

Zhang Q, Liang F, Liang P P, *et al.*, 2020. Investigation of fractal characteristics and its main controlling factors of shale reservoir: A case study of the Longmaxi shale in Weiyuan shale gas field [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(1):110-122. (in Chinese)

赵春段, 张介辉, 蒋佩, 等, 2022. 页岩气地质工程一体化过程中的多尺度裂缝建模及其应用[J]. *石油物探*, 61(4):719-732.

Zhao C D, Zhang J H, Jiang P, *et al.*, 2022. Multi-scale fracture modeling and its application in shale gas geology and engineering integration [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 61(4):719-732. (in Chinese)

(责任编辑:黄维婷)



(上接第 45 页)

徐敏, 裴向军, 张晓超, 2014. 强震触发石碑塬滑坡黄土动力特性[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(4):492-498.

Xu M, Pei X J, Zhang X C, 2014. Dynamic characteristics of loess from dynamic characteristics of loess from Ningxia Shibei yuan landslide triggered by Haiyuan earthquake [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(4):492-498. (in Chinese)

张晓超, 2015. 地震诱发石碑塬低角度黄土滑坡形成机理的试验研究[D]. 成都:成都理工大学档案馆, 2015.

Zhang X C, 2015. Experimental Study on Mechanism of Shibei yuan Loess Landslide Triggered by Earthquake [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

Wu Q L, Zhao Z J, Liu L, *et al.*, 2016. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty [J]. *Science*, 353:579-582.

(责任编辑:魏 崑)